

基于非全局轴向多光强限制的快速收敛叠层成像方法

窦健泰¹, 武俊超¹, 杨忠明^{2*}¹江苏科技大学理学院, 江苏 镇江 212100;²山东大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266237

摘要 扩展叠层成像方法(ePIE)到达收敛条件时需消耗大量迭代次数及计算时间,计算负担大。为提高 ePIE 的收敛速度,提出了一种基于非全局轴向多光强限制的快速收敛 ePIE。该方法要求经样品调制的衍射光强由分光棱镜分束后用两个相同型号但轴向距离不同的 CCD 接收,在成像算法上分为 2 次轴向多光强限制和 ePIE 重建阶段。轴向多光强限制阶段在 ePIE 中加入了两个 CCD 平面之间的往返迭代及强度限制,可约束物函数和照明光场函数向有效方向更新,进而提高收敛速度;ePIE 重建阶段使用常规 ePIE 算法,既能保持轴向多光强限制阶段带来的有效收敛速度,又能减少两个 CCD 多次往返的衍射计算,提高时间效率。仿真及实验结果表明,本方法在收敛速度和时间效率方面均具有优越的性能。

关键词 信息处理; 相位复原; 叠层成像; 快速收敛; 非全局轴向多光强限制

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2109002

1 引言

叠层成像方法(PIE)作为一种新发展的相位复原方法,具有视场大、成像范围可扩展、无像差等优点,在可见光、X 射线和电子束等领域的相位成像研究中得到了广泛应用^[1-4]。PIE 作为空域相位复原方法,要求照明光对样品进行阵列扫描,同时记录各扫描位置的衍射光强,保证相邻位置之间有一定比例的重叠照明面积。早期 PIE 对实验条件的要求较高,如已知精确的照明光且照明光完全相干、已知精确的阵列扫描及物体位置和平面间的轴向距离、记录的衍射图无噪声及待测物为薄物体。这些实验条件在实际中很难满足,因此,人们提出了多种解决部分相干性^[5]、无照明光先验信息^[6-8]、校正扫描位置和轴向距离误差^[9-11]、抑制噪声影响^[12]及厚样品^[13]的方法。

相比其他同步重建照明光和物函数方法^[6,8],扩展 PIE(ePIE)^[7]在恢复照明光方面有独特的优势,其在每次迭代过程中将全部记录的衍射图逐个

代入迭代算法,并恢复出照明光和物函数。尽管 ePIE 在实验中能以合适的速度收敛,但仍需要成百次的迭代。为提高 ePIE 的收敛速度、缩短迭代时间,人们提出了三类快速收敛方法:第一类是增加光场校正的限制条件,如振幅幅度增强限制^[14]、阵列孔形状约束^[15]及全局轴向多光强限制^[16];第二类是优化物函数解算方法即更新函数和权重因子,如更新权重因子的自适应步长选择策略^[17]及基于神经网络中动量的权重因子和函数更新方法^[18];最后一类是构建合理的初始物函数和照明光场函数,如应用频谱合成方法构建初始物函数^[19],但该方法仅适用于 RGB(Red, Green, Blue)三波长或多波长照明等特定情况。

本课题组在前期研究了全局轴向多光强限制快速收敛 PIE(MAIC-PIE)^[16],该方法能大幅提高收敛速度,缩短迭代次数,但对时间效率的提升不明显,原因是该方法在每次迭代过程中都增加了两个 CCD 之间的往返迭代及光强限制。时间效率 η 指达到误差函数阈值时 ePIE 或 MAIC-PIE 消耗的时

收稿日期: 2021-02-23; **修回日期:** 2021-04-01; **录用日期:** 2021-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(61905131)、江苏省自然科学基金(BK20190954)、山东省自然科学基金(ZR2019QF013)、江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB140007)

通信作者: *zhongming.yang@sdu.edu.cn

间 T 与非全局轴向多光强限制快速收敛 ePIE (ngMAIC-PIE) 消耗的时间 T_{ng} 差与 T 的比值, 即 $\eta = (T - T_{ng}) / T \times 100\%$, 时间效率越高, 表明节省的时间就越多。Binamira 等^[20] 指出基于轴向多光强限制的相位复原迭代算法中每个轴向光强均需参与初始迭代, 但随着迭代次数的增加, 每次迭代时轴向多光强限制则无需参与运算。MAIC-PIE 中的轴向多光强限制也无需参与每次迭代, 只需在适当迭代阶段引入即可。因此, 本文提出了一种 ngMAIC-PIE。该方法在系统结构上依然采用文献[16]中的结构, 成像算法包括 2 次轴向多光强限制和 ePIE 重建阶段, 即交替使用轴向多光强限制与 ePIE。轴向多光强限制阶段是在 ePIE 中加入两个 CCD 之间的往返迭代及强度限制, 该阶段可约束物函数和照明光场函数向有效方向更新, 进而提高收敛速度; ePIE 重建阶段使用常规 ePIE 算法, 既能保持前阶段快速收敛的趋势, 又能减少 CCD 多次往返的衍射计算, 提高计算效率。实验结果表明, ngMAIC-PIE 与文献[16]描述的 MAIC-PIE 具有相似的快速收敛特性, 但比 MAIC-PIE 和 ePIE 具有更高的时间效率。

2 基本原理

ngMAIC-PIE 系统的原理如图 1 所示, 将待测物体放置在 x - y 二维位移台上, 并在垂直于光轴的平面上进行逐行逐列移动。照明光与待测物体作用后的衍射光经分光棱镜分成两束相互垂直的光束。两个相同型号的 CCD 分别放置在两个光束中, 且与分光棱镜的轴向距离不同。

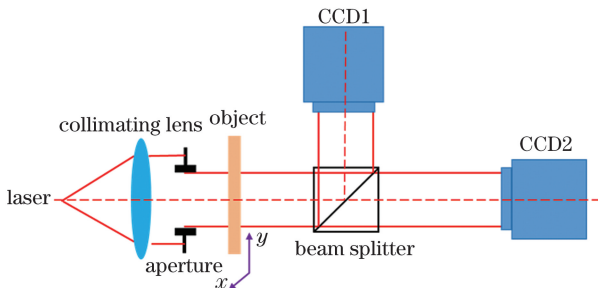


图 1 ngMAIC-PIE 系统的原理

Fig. 1 Structure of the ngMAIC-PIE system

ngMAIC-PIE 系统中未放入样品时, 首先获取 CCD1 和 CCD2 平面关于照明光场的光强, 标记为 $I_{illum, CCD1}(u)$ 和 $I_{illum, CCD2}(u)$ 。用 ngMAIC-PIE 系统采集待测物衍射光强时, 每个 CCD 共记录 J 个衍射光斑, 可记为 $I_i^{CCD}(u, s_j)$, 其中, $i = 1, 2, j = 1, \dots, J, u$ 为 CCD 的平面坐标, s_j 为第 j 个衍射图的扫描位置。ngMAIC-PIE 的本质是轴向多光强限制与

ePIE 交替使用, 轴向多光强限制阶段是在 ePIE 重建中加入两个 CCD 之间的往返迭代及强度限制, 轴向多光强限制阶段的具体迭代过程如下。

1) 将经过物体的衍射光 $\psi_{m, obj}(r, s_j) = O_m(r, s_j) \cdot P_m(r)$ 传输到 CCD1 平面, 获得波前 $\Psi_{m, CCD1}(u, s_j) = F[\psi_{m, obj}(r, s_j)]$ 。其中, F 为角谱传输函数, m 为迭代次数, $O_m(r, s_j)$ 和 $P_m(r)$ 分别为第 m 次迭代时的物函数和探针复振幅函数, 初始值为 $O_0(r)$ 和 $P_0(r)$, r 为物平面坐标。

2) 用 $\sqrt{I_{CCD1}(u, s_j)}$ 替换 $\Psi_{m, CCD1}(u, s_j)$ 的振幅, 将校正后的波前传输到 CCD2 平面, 即 $\Psi_{m, CCD2}(u, s_j) = F[\Psi_{m, CCD1}(r, s_j)]$; 用 $\sqrt{I_{CCD2}(u, s_j)}$ 替换 $\Psi_{m, CCD2}(u, s_j)$ 的振幅, 将校正后的 $\Psi_{m, CCD2}(u, s_j)$ 用逆角谱衍射传输回物平面, 获得波前 $\psi'_{m, obj}(r, s_j)$ 。

3) 更新物函数和照明光场, 可表示为

$$O_{m+1}(r) = O_m(r) + \frac{|P_m(r)|}{|P_m(r)_{max}|} \frac{|P_m^*(r)|}{|P_m(r)|^2 + \delta} \times \alpha [\psi'_{m, obj}(r, s_j) - \psi_{m, obj}(r, s_j)], \quad (1)$$

$$P_{m+1}(r) = P_m(r) + \frac{|O_m(r)|}{|O_m(r)_{max}|} \frac{|O_m^*(r)|}{|O_m(r)|^2 + \delta} \times \beta [\psi'_{m, obj}(r, s_j) - \psi_m(r, s_j)], \quad (2)$$

式中, α 和 β 为固定值, 取值范围为 $[0, 1]$, 实验取 $\alpha = \beta = 1, \delta$ 为确保数值稳定的归一化常数。

4) 将更新后的 $P_{m+1}(r)$ 传输回 CCD1 平面, 获得波前 $\theta_{CCD1}(u)$, 并用 $\sqrt{I_{illum, CCD1}(u)}$ 更新 $\theta_{CCD1}(u)$ 的振幅, 获得更新后的波前 $\theta'_{CCD1}(u)$ 。

5) 将 $\theta'_{CCD1}(u)$ 传输到 CCD2 平面, 获得波前 $\theta_{CCD2}(u)$, 并用 $\sqrt{I_{illum, CCD2}(u)}$ 更新 $\theta_{CCD2}(u)$ 的振幅, 获得更新后的波前 $\theta'_{CCD2}(u)$ 。

6) 将 $\theta'_{CCD2}(u)$ 回传至物平面, 获得更新后的探针 $P'_{m+1}(r)$ 。

7) 令 $P_{m+1}(r) = P'_{m+1}(r)$, 重复步骤 1)~步骤 7), 直至满足收敛条件。

ngMAIC-PIE 的计算流程如图 2 所示, 共包含 2 次轴向多光强限制和 ePIE 重建阶段。相比 MAIC-PIE 的全局轴向多光强限制, ngMAIC-PIE 在 ePIE 重建阶段取消了轴向多光强限制中两个 CCD 之间的往返迭代, 缩短了迭代时间, 提高了时间效率。轴向多光强限制阶段的迭代次数选取规律: 用 $M_o (o = 1, 2, 3, 4)$ 表示各阶段起始迭代次数, 在前 20 次迭代内完成 2 次轴向多光强限制阶段 ($M_5 \leq 20$), 第 1 次轴向多光强限制阶段应在前 10 次迭代内完成 ($M_1 \leq 10$),

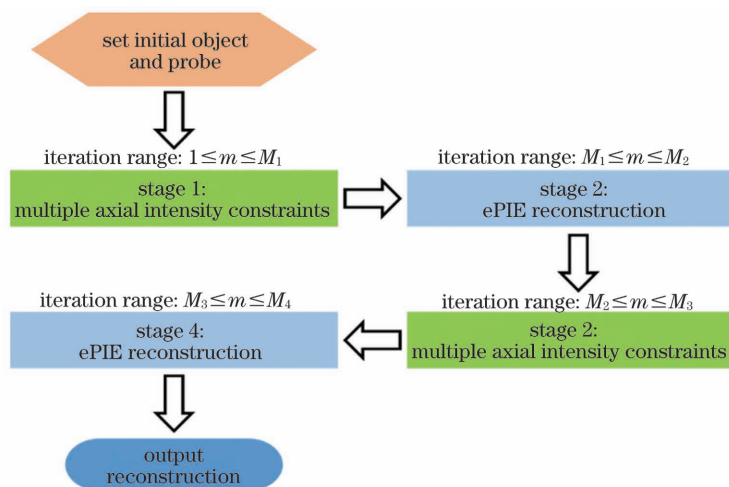


图 2 ngMAIC-PIE 的流程图

Fig. 2 Flow chart of the ngMAIC-PIE

第 2 次轴向多光强限制阶段应在第 10~20 次迭代之间($10 \leq M_2 < M_3 \leq 20$)。

3 仿真分析

为验证 ngMAIC-PIE 的收敛特性和时间效率,首先建立仿真模型,该模型选用的系统参数:波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$; CCD 的尺寸为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,像素尺寸为 $4.4 \mu\text{m} \times 4.4 \mu\text{m}$;孔径光阑到物体的轴向距离为 10 mm ,物体到 CCD1 的轴向距离为 64 mm ,

CCD1 到 CCD2 的轴向距离为 10 mm ;阵列扫描数量为 5×5 ,步长为 46 pixel ;用图像“cameraman”和“westconcordorthophoto”作为待测物的振幅和相位,振幅取值范围为 $0 \sim 1$,相位取值范围为 $0 \sim \pi \text{ rad}$;分光棱镜的分光比为 $50:50$;ngMAIC-PIE 在迭代次数为 $1 \sim 5$ 和 $10 \sim 15$ 时为轴向多光强限制阶段,其余迭代次数为 ePIE 重建阶段。图 3 为迭代 200 次后 ePIE、MAIC-PIE 和 ngMAIC-PIE 的复原结果,可以发现,三种方法的复原结果基本一致,原因是迭代次数较大。

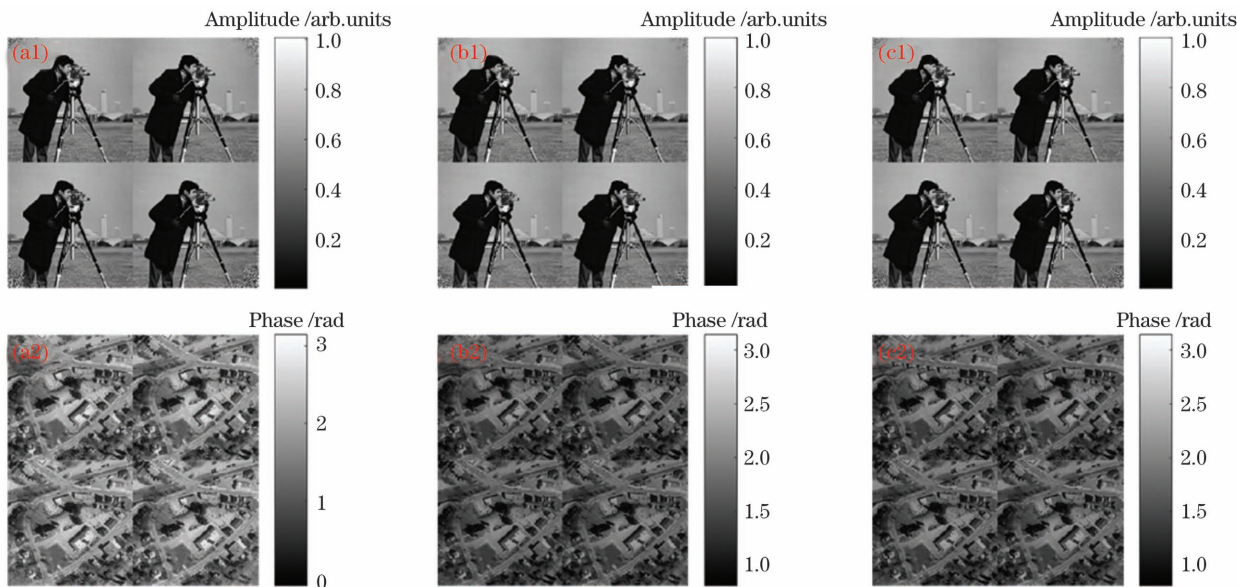


图 3 不同方法的重建结果。(a)ePIE;(b)MAIC-PIE;(c)ngMAIC-PIE

Fig. 3 Reconstruction results of different methods. (a) ePIE; (b) MAIC-PIE; (c) ngMAIC-PIE

选用重建振幅、相位与真实值偏差的均方根(RMS)作为评价指标,对比不同方法的收敛速度和重建精度。RMS 的计算范围为整个重建图像的中心部分,原因是重建物边缘部分几乎无重叠,重建质

量很差,用这些部分重建时会导致 RMS 计算不准确,进而影响评价指标的真实性。图 4 为 ePIE、MAIC-PIE 和 ngMAIC-PIE 三种方法的振幅和相位重建误差的 RMS。可以发现,在系统参数相同的

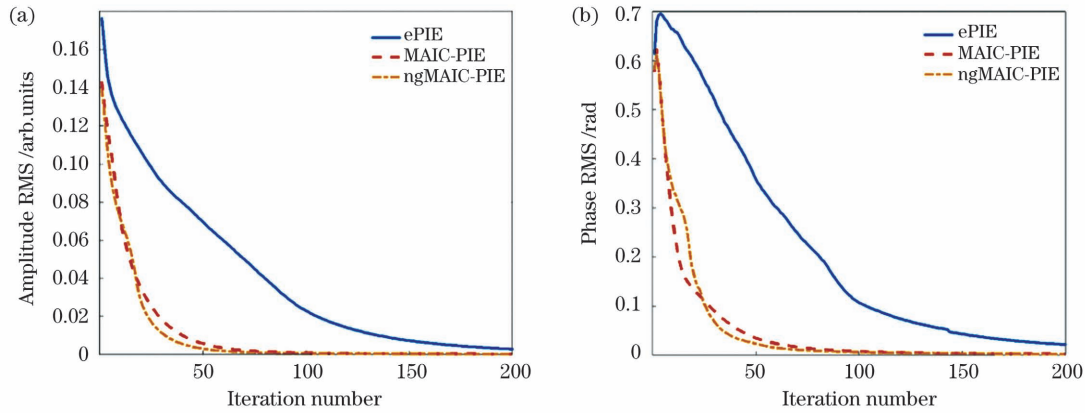


图 4 不同方法的重建误差。(a)振幅;(b)相位

Fig. 4 Reconstruction error of different methods. (a) Amplitude; (b) phase

情况下,ngMAIC-PIE 和 MAIC-PIE 的收敛性能和重建精度均优于 ePIE,且 ngMAIC-PIE 和 MAIC-PIE 的性能基本一致。还可以发现,增加迭代次数可以提高重建质量,但不同方法的收敛速率不同。在迭代 50 次后,ePIE 的重建误差较大,而 ngMAIC-PIE 和 MAIC-PIE 的重建误差较小。在迭代 100 次后,ePIE 的重建误差依旧突出,而 ngMAIC-PIE 和 MAIC-PIE 的重建误差几乎为 0。这表明相比传统 ePIE,在相同迭代次数时,ngMAIC-PIE 和 MAIC-PIE 方法的收敛速度更快。

实际实验中,不能总是获得物体的实际复函数,因此,很难计算重建误差的 RMS。可选用 CCD1 位置重建的振幅与实际记录光强图的偏差评价收敛速度和重建精度。误差函数 E 可表示为

$$E = \frac{\sum_j \left| \sqrt{I_{\text{CCD1}}(u, s_j)} - |\Psi_{m, \text{CCD1}}(u, s_j)| \right|^2}{\sum_j I_{\text{CCD1}}(u, s_j)} \quad (3)$$

图 5 为三种方法迭代 200 次的误差函数 E ,可

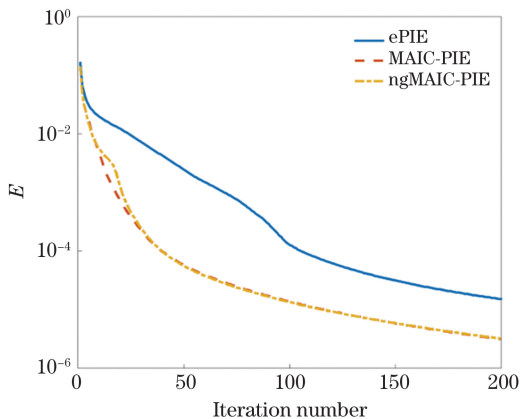


图 5 不同方法的误差函数 E

Fig. 5 Error function E of different methods

以发现,ngMAIC-PIE 和 MAIC-PIE 的收敛速度和精度依然优于 ePIE,且 ngMAIC-PIE 和 MAIC-PIE 的性能几乎一致。当迭代终止条件为阈值 $E_t = 0.0001$,即 E 小于等于阈值 E_t 时终止迭代,则 ePIE、MAIC-PIE 和 ngMAIC-PIE 的最小迭代次数分别为 106、40 和 40,用 i7-6700HQ 和 24 GB RAM 的计算时间分别为 2729.712 s、1509.76 s 和 1150.00 s,相比 ePIE 和 MAIC-PIE,ngMAIC-PIE 的计算时间分别缩短了 57.87% 和 23.83%。这表明相比 ePIE,ngMAIC-PIE 具有更快的收敛速度及更高的时间效率;相比 MAIC-PIE,ngMAIC-PIE 具有近似的收敛特性及更高的时间效率。

4 实验结果及分析

为进一步验证本方法的可行性,搭建了现场实验装置,具体参数:照明光源是波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器;两个 CCD 的型号为 DMK23G274, CCD 的尺寸为 1600 pixel×1200 pixel,像素尺寸为 4.4 μm×4.4 μm;通过 x - y 二维位移台控制待测物体在垂直光轴平面上阵列移动,扫描步长为 0.2 mm;孔径光阑的有效直径为 2 mm;孔径光阑到物体的轴向距离为 10 mm,物体到 CCD1 的轴向距离为 65.3 mm,CCD1 到 CCD2 的轴向距离为 10 mm。ngMAIC-PIE 在迭代次数为 1~10 和 17~20 时为轴向多光强限制阶段,其余迭代次数为 ePIE 重建阶段。物体到 CCD1 以及 CCD1 到 CCD2 的轴向距离误差会严重影响重建结果,为减少轴向距离误差以及精确确定参与迭代过程中的轴向距离,将 CCD1 和 CCD2 放置在位移平台 (Thorlabs KMTS25E) 上,以调整轴向距离,同时通过迭代自聚焦方法^[11]单独获得物体与 CCD1 及物体与 CCD2 之间的轴向距离。除轴向距离误差外,两个 CCD 之

间的配准精度也会影响重建结果,因此,利用模拟退火算法校正配准精度^[9,16],且轴向距离和配准精度在系统参数不变的情况下仅需校正一次。图 6 为 100 次迭代后不同方法对分辨率板 USAF 1951 的复原结果,可以发现,ePIE 的重建结果存在明显的伪影,中心线对模糊,而 MAIC-PIE 和 ngMAIC-PIE 的重建结果线对清晰,这表明在相同迭代次数情况下,MAIC-PIE 和 ngMAIC-PIE 均具有较好的收敛特性和重建精度。但 MAIC-PIE 和 ngMAIC-PIE 都引入了 CCD 之间的往返迭代计算,为对比分

析 ngMAIC-PIE、ePIE 和 MAIC-PIE 的时间效率,图 7 给出迭代终止条件 $E_t=0.002$ 时的误差函数 E ,其中,ePIE、MAIC-PIE 和 ngMAIC-PIE 对应的最小迭代次数分别为 155、70 和 78,用 i7-6700HQ 和 24 GB RAM 的计算时间分别为 4989.45 s、3302.60 s 和 2720.68 s,相比 MAIC-PIE 和 ePIE,ngMAIC-PIE 的计算时间分别缩短了 17.62% 和 45.37%。这表明本方法能有效提高收敛速度以及减少计算时间,相比 MAIC-PIE 具有更高的时间效率。

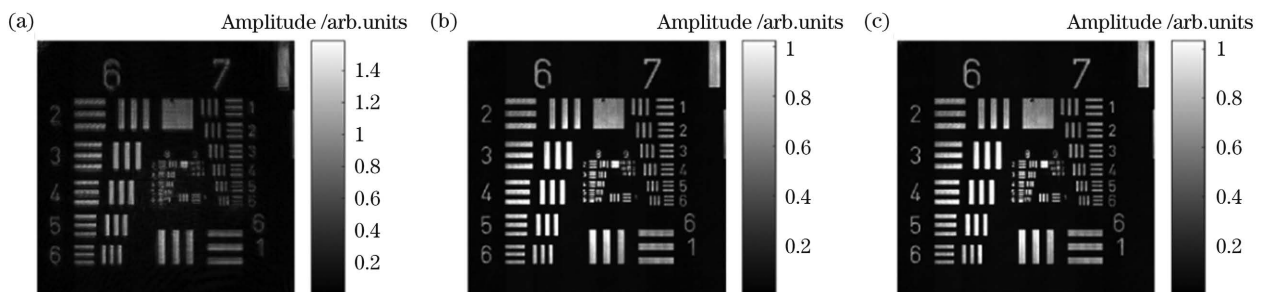


图 6 100 次迭代后分辨率板的实验结果。(a)ePIE;(b)MAIC-PIE;(c)ngMAIC-PIE

Fig. 6 Experimental results of a resolution target after 100 iterations. (a) ePIE; (b) MAIC-PIE; (c) ngMAIC-PIE

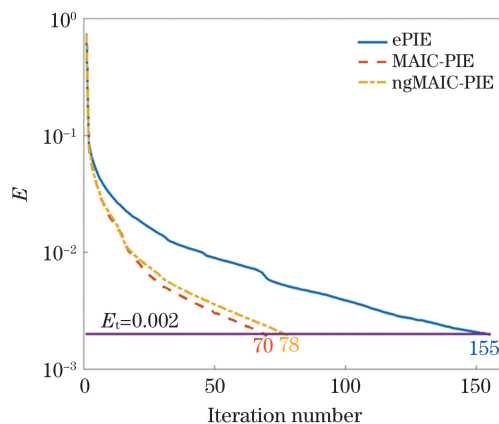


图 7 迭代 100 次后不同方法的误差度量 E

Fig. 7 Error metric E of different methods after 100 iterations

5 结 论

为进一步提高 ePIE 的收敛速度和时间效率,在 MAIC-PIE 的基础上提出了非全局策略,即交替使用轴向多光强限制和 ePIE 重建。非全局策略既能保持 MAIC-PIE 全局快速收敛的特性,又可以在 ePIE 重建阶段减少 CCD 之间的往返迭代计算,提高时间效率。仿真和实验结果表明,本方法在快速收敛和时间效率方面均具有优越的性能。对比 ngMAIC-PIE、MAIC-PIE 和传统 ePIE 的性能发现,在前几次迭代中,MAIC-PIE 和 ngMAIC-PIE

均能快速达到收敛并提高重建质量;在后续迭代中,ngMAIC-PIE 与 MAIC-PIE 具有近乎相似的收敛特性,且都比 ePIE 的收敛速度快。ngMAIC-PIE 为 PIE 在快速收敛和时间效率方面提供了一种简单有效的方法。后续研究将集中在轴向多光强限制阶段精细化选取规律、是否增加轴向多光强限制阶段和 ePIE 重建阶段的交替次数以及平衡 CCD 数量与计算时间的关系等方面。

参 考 文 献

- [1] Rodenburg J M, Faulkner H M L. A phase retrieval algorithm for shifting illumination [J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(20): 4795-4797.
- [2] Pfeiffer F. X-ray ptychography [J]. Nature Photonics, 2018, 12(1): 9-17.
- [3] Guo C, Geng Y, Zhai Y L, et al. Research progress on parameter-changed computational imaging techniques [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(16): 160001.
郭澄, 耿勇, 翟玉兰, 等. 变参数计算成像技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(16): 160001.
- [4] Zong B M, Luan J Y, Jiang Z L, et al. Method to measure transmitting wave-front of imaging lens based on extended ptychographical iterative engine[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0804001.
纵榜铭, 栾嘉蕴, 蒋志龙, 等. 基于叠层扫描成像技

- 术的成像透镜透射波前测量方法[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0804001.
- [5] Thibault P, Menzel A. Reconstructing state mixtures from diffraction measurements[J]. Nature, 2013, 494(7435): 68-71.
- [6] Guizar-Sicairos M, Fienup J R. Phase retrieval with transverse translation diversity: a nonlinear optimization approach[J]. Optics Express, 2008, 16(10): 7264-7278.
- [7] Maiden A M, Rodenburg J M. An improved ptychographical phase retrieval algorithm for diffractive imaging[J]. Ultramicroscopy, 2009, 109(10): 1256-1262.
- [8] Thibault P, Dierolf M, Menzel A, et al. High-resolution scanning X-ray diffraction microscopy[J]. Science (New York, N. Y.), 2008, 321(5887): 379-382.
- [9] Maiden A M, Humphry M J, Sarahan M C, et al. An annealing algorithm to correct positioning errors in ptychography[J]. Ultramicroscopy, 2012, 120: 64-72.
- [10] Zhang F C, Peterson I, Vila-Comamala J, et al. Translation position determination in ptychographic coherent diffraction imaging [J]. Optics Express, 2013, 21(11): 13592-13606.
- [11] Dou J T, Gao Z S, Ma J, et al. Iterative autofocusing strategy for axial distance error correction in ptychography[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 98: 56-61.
- [12] Godard P, Allain M, Chamard V, et al. Noise models for low counting rate coherent diffraction imaging[J]. Optics Express, 2012, 20(23): 25914-25934.
- [13] Maiden A M, Humphry M J, Rodenburg J M. Ptychographic transmission microscopy in three dimensions using a multi-slice approach[J]. Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision, 2012, 29(8): 1606-1614.
- [14] Zhang F, Chen B, Morrison G R, et al. Phase retrieval by coherent modulation imaging[J]. Nature Communications, 2016, 7: 13367.
- [15] Sun A H, Jiang Z L, Kong Y, et al. Multi-probe ptychographic iterative engine method [J]. Optics Communications, 2019, 436: 174-179.
- [16] Dou J T, Wu J C, Zhang Y M, et al. Accelerated convergence extended ptychographical iterative engine using multiple axial intensity constraints[J]. Optics Express, 2020, 28(3): 3587-3597.
- [17] Zuo C, Sun J, Chen Q. Adaptive step-size strategy for noise-robust Fourier ptychographic microscopy [J]. Optics Express, 2016, 24(18): 20724-20744.
- [18] Maiden A, Johnson D, Li P. Further improvements to the ptychographical iterative engine[J]. Optica, 2017, 4(7): 736-745.
- [19] Dou J T, Zhang T, Wei C, et al. Single-shot ptychographic iterative engine based on chromatic aberrations[J]. Optics Communications, 2019, 440: 139-145.
- [20] Binamira J F, Almoró P F. Accelerated single-beam multiple-intensity reconstruction using unordered propagations[J]. Optics Letters, 2019, 44(12): 3130-3133.

Fast-Convergence Extended Ptychographical Iterative Engine Based on Nonglobal Multiple Axial Intensity Constraints

Dou Jiantai¹, Wu Junchao¹, Yang Zhongming^{2*}

¹ College of Science, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212100, China;

² School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China

Abstract

Objective The extended ptychographical iterative engine (ePIE) is a powerful phase-retrieval method that provides label-free, high-contrast imaging and robustness. In the ePIE method, all diffraction patterns captured during each iteration are applied to perform batch improvement and iteratively recover the probe and object in sequence. The ePIE can converge reasonably at a proper rate in practical experiments; however, hundreds of time-consuming iterations are required. In our previous work, a technique is proposed to increase the convergence speed of ptychographic imaging based on multiple axial intensity constraints (MAIC-PIE). In this strategy, the diffracted light from the sample is separated axially using a beam splitter and inserting multiple charge-coupled devices (CCDs) into the splitter beams. The multiple CCDs work together independently to obtain multiple axial intensity images. Such

multiple axial intensity images function as an additional constraint to strengthen the connection between the intensity and the unknown phase. In MAIC-PIE, each axial intensity is required in the calculation over all iterations; however, with an increasing number of iterations, the multiple axial intensity constraints are not required in the calculation of each iteration. Thus, we modified the MAIC-PIE and propose a fast-convergence ePIE based on nonglobal multiple axial intensity constraints (ngMAIC-PIE) to reduce calculation time.

Methods In the experimental apparatus of ngMAIC-PIE, the light diffracted from the sample is split spatially into two orthogonal beams using a beam splitter. Two CCDs (CCD1 and CCD2) are placed at two axial positions after the beam splitter. They are used to record the diffraction patterns generated by the interaction of the sample with the localized probe. The ngMAIC-PIE reconstruction method involves four stages: multiple axial intensity constraints, ePIE reconstruction, multiple axial intensity constraints, and ePIE reconstruction. In the multiple axial intensity constraint stage, a round-trip iteration between the two CCDs and intensity constraints is added to the ePIE method, where the object function and light field function can be constrained to update along the effective direction and improve the convergence speed. In the ePIE reconstruction stage, the conventional ePIE method is employed, which maintains the rapid convergence in the previous stage and reduces the calculation time of the multiple round trips of the CCDs. The selection rule for the number of iterations for the multiple axial intensity constraint stage is summarized as follows. In the first 20 iterations, two stages of the multiple axial intensity constraints are completed. Here, the number of iterations at the end of the first stage and the beginning of the second stage should vary between 5 and 10. Further, the first and second stages of the multiple axial intensity constraints should be completed in 1–10 and 10–20 iterations, respectively.

Results and Discussion In a simulation evaluation, the root mean square (RMS) value relative to the amplitude and phase error from each iteration is evaluated in terms of reconstruction accuracy and convergence speed. Using the same system parameters, the convergence performance and reconstruction accuracy of the ngMAIC-PIE and MAIC-PIE exceed those of the ePIE and the performance of ngMAIC-PIE is similar to that of MAIC-PIE (Fig. 4). The reconstruction quality can be improved by increasing the number of iterations; however, the convergence rate differs. The ngMAIC-PIE method demonstrates considerably faster convergence than the conventional ePIE method for the target test object (Fig. 4). In an experiment, when reaching the iteration termination condition $E_r = 0.002$, the minimum numbers of iterations for ePIE, MAIC-PIE, and ngMAIC-PIE are 155, 70, and 78, respectively. In addition, the computation times achieved by ePIE, MAIC-PIE, and ngMAIC using an I7-6700HQ CPU with 24 GB RAM are 4989.45, 3302.60, and 2720.68 s, respectively (Fig. 7). Compared with MAIC-PIE and ePIE, the computation time of ngMAIC-PIE is reduced by 17.62% and 45.37%, respectively. Experimental results demonstrate that the proposed method can effectively improve the convergence speed and reduce the calculation time. In addition, the proposed method demonstrates higher time efficiency than MAIC-PIE.

Conclusions A ngMAIC-PIE strategy is proposed to improve the convergence speed and time efficiency of ePIE, in which the multiple axial intensity constraints and ePIE reconstruction methods are employed alternatively. The proposed strategy maintains the fast convergence characteristics of MAIC-PIE. Moreover, the round-trip iteration calculation between CCDs can be reduced in the ePIE reconstruction stage, which improves time efficiency and reduces the calculation time. Simulation and experimental results show that the proposed method exhibits fast convergence and high time efficiency. Furthermore, we compared the proposed ngMAIC-PIE with MAIC-PIE and the traditional ePIE. The results demonstrate that MAIC-PIE and ngMAIC-PIE can obtain reasonable solutions quickly, with improved reconstruction quality in previous several iterations. In subsequent iterations, ngMAIC-PIE and MAIC-PIE exhibit nearly similar convergence characteristics and both converge faster than ePIE. The proposed ngMAIC-PIE strategy is both simple and effective and demonstrates fast convergence and high time efficiency.

Key words information processing; phase retrieval; ptychographical imaging; fast-convergence; nonglobal multiple axial intensity constraints

OCIS codes 200.3050; 100.5070; 100.3010